УДК 68-83-52

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ТИПОВЫМ МЕТОДИКАМ

Н.В. Кояин, О.П. Мальцева, Л.С. Удут

Томский политехнический университет
E-mail: epatpu@mail2000.ru

Проведено обобщение типовых методик оптимизации контуров регулирования систем электропривода, систематизированы и дополнены показатели качества при отработке управляющих и возмущающих воздействий. Рассмотрены модульный и линейный оптимумы настройки контуров.

Многоконтурные системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией находят широкое практическое применение в электроприводах как постоянного, так и переменного тока. В соответствии с принципом последовательной коррекции каждому звену объекта управления с большой постоянной времени должно соответствовать звено с обратной передаточной функцией в составе регулятора. Поскольку в составе объекта управления имеются инерционные звенья, то регулятор должен содержать соответствующее число форсирующих звеньев. Сложность объекта управления в контуре регулирования однозначно определяет сложность его регулятора. Если ограничиться пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД)-регулятором как наиболее сложным, то речь может идти об оптимизации двух типов контуров с объектами управления, содержащими инерционное звено с малой постоянной времени T_μ и последовательно включенные с ним:

- инерционные звенья первого порядка (не более двух) с большими постоянными времени $T_1>T_2>T_\mu$ (рис. 1, *а*);
- интегрирующее звено и не более одного инерционного звена с большими постоянными времени $T_0>T_2>T_\mu$ (рис. 1, *б*).

При настройке контура тип и параметры регулятора выбираются таким образом, что регулятор компенсирует большие инерционности объекта и приводит передаточную функцию контура к нормированному виду с учетом значения эквивалентной малой постоянной времени и выбранного критерия оптимизации. В практике наладки систем электропривода основное применение находят два критерия оптимальной настройки контуров по управлению: модульный (технический) оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО). Впервые предложенные С. Кесслером в 50-е годы прошлого века [1, 2] и получившие широкое распространение в электроприводах постоянного тока, данные критерии и сегодня не утратили своей значимости. Простые и удобные для практического использования, обеспечивающие качественные показатели, удовлетворяющие в большинстве случаев предъявляемым требованиям, эти ставшие классическими методы притягивают к себе пристальное внимание специалистов в области систем управления, занимающихся проектированием и созданием качественных электроприводов, в том числе переменного тока, разработкой новых методов идентификации технологических процессов и настройки промышленных регуляторов [3–6]. Несмотря на многочисленные публикации, посвященные практической оптимизации

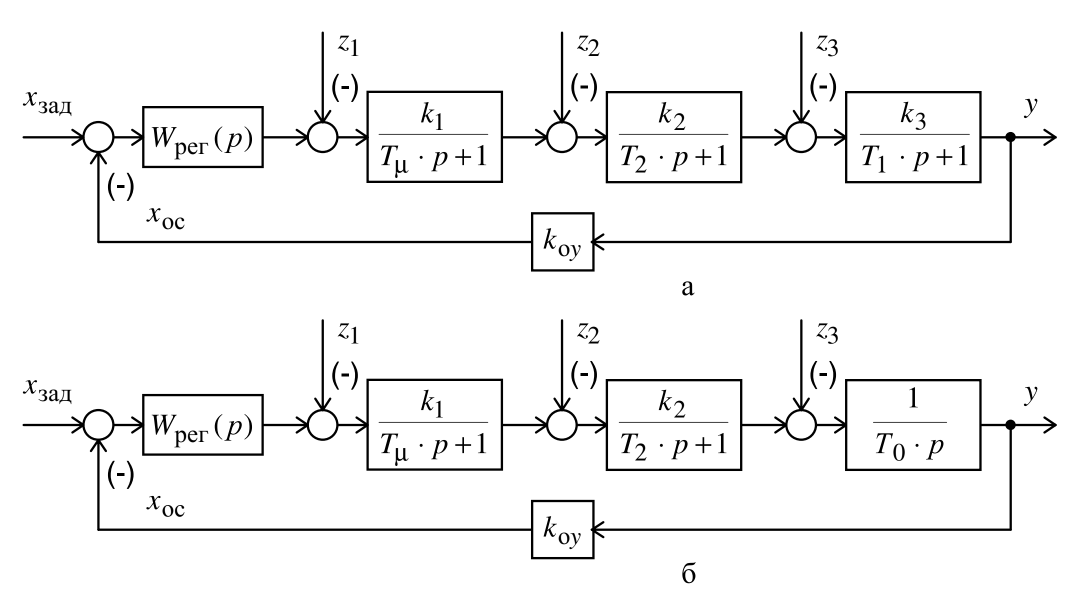


Рис. 1. *Контур регулирования с объектом управления, содержащим: а) только инерционные звенья; б) интегрирующее звено*

систем регулирования, ряд вопросов, касающихся выбора критериев оптимизации, качества отработки возмущающих воздействий, методики настройки систем с последовательно-параллельной коррекцией и т.д., остается по-прежнему нерешенным. Новые области практического применения требуют не только сравнительного анализа существующих методик оптимизации, но и дальнейшего их развития с учетом возрастающих требования к качеству регулирования и возможностей современной элементной базы.

Целью данной статьи является обобщение типовых методик оптимизации систем автоматизированного электропривода, систематизация и дополнение качественных показателей при отработке контуром регулирования управляющих и возмущающих воздействий.

Модульный оптимум настройки контура

Простейший оптимизированный по МО контур характеризуется наличием одного интегрирующего звена в контуре регулирования, представляет собой систему второго порядка и имеет следующие нормированные передаточные функции:

– разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{раз}} = \frac{y(t)}{x_{\text{зад}}(t)} = \frac{1}{aT_\mu\, p(T_\mu\, p+1)}; \qquad (1)$$

– замкнутого контура по управлению

$$W(p)_{\text{у.зам}} = \frac{y(t)}{x_{\text{зад}}(t)} = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \frac{1}{aT_\mu\, p(T_\mu\, p+1)+1} = \frac{1}{k_{\text{оу}}} \frac{1}{aT_\mu^2\, p^2 + aT_\mu\, p + 1}, \qquad (2)$$

где $x_{\text{зад}}(t)$ – задающее воздействие; $y(t)$ – выходная координата; $k_{\text{оу}}$ – коэффициент обратной связи; a – коэффициент оптимизации; p – оператор дифференцирования.

Передаточная функция замкнутого контура по возмущению зависит от места приложения возмущающего воздействия z_i

$$W(p)_{\text{в.зам}} = \frac{y(t)}{z_i(t)} = W'_{\text{об}}(p) \frac{aT_\mu\, p(T_\mu\, p+1)}{aT_\mu^2\, p^2 + aT_\mu\, p + 1}, \qquad (3)$$

где $W'_{\text{об}}(p)$ – передаточная функция части объекта управления, входящей в прямой канал отработки возмущения.

Передаточные функции оптимизированного по МО разомкнутого (1) и замкнутого по управлению (2) контура не зависят от состава объекта управления, а значения коэффициентов полинома знаменателя, как и для передаточной функции по возмущению (3), определяются только величиной малой постоянной времени объекта T_μ.

Вид и значения коэффициентов полинома числителя передаточной функции по возмущению (3) зависят от типа и параметров звеньев объекта управления, к входу которых приложено возмущающее воздействие. В результате реакция контура на возмущающее воздействие и установившаяся ошибка будут зависеть от места приложения воздействия. В дальнейшем в качестве основного возмущающего воздействия рассматривается приложенное к выходному звену объекта управления возмущение z_3, что является наиболее характерным случаем для контуров регулирования систем управления электроприводов. По МО может быть оптимизирован любой из приведенных на рис. 1 контуров.

Оптимизация по МО контура с инерционными звеньями

Для настройки на МО контура с инерционными звеньями (рис. 1, *а*) в общем случае выбирается ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{рег}}(p) = k'_{\text{рег}} \frac{(T_{\text{из}}p+1)(T_{\text{уп}}p+1)}{T_{\text{и}}\, p} = k_{\text{рег}} \frac{(T_{\text{из}}p+1)(T_{\text{уп}}p+1)}{T_{\text{из}}\, p}, \qquad (4)$$

где $$k'_{\text{рег}} = \frac{1}{k_1 k_2 k_3 k_{\text{оу}}}, \qquad k_{\text{рег}} = \frac{T_1}{k_1 k_2 k_3 k_{\text{оу}}\, aT_\mu} \qquad (5)$$

– коэффициент усиления регулятора;

$$T_{\text{из}} = T_{\text{рег}} = T_1 \qquad (6)$$

– постоянная времени изодрома (регулятора), с;

$$T_{\text{уп}} = T_2 \qquad (7)$$

– постоянная времени упреждения, с;

$$T_{\text{и}} = aT_\mu \qquad (8)$$

– постоянная времени интегрирования, с;

– k_1, k_2 и k_3 – коэффициенты передачи звеньев прямой цепи;

– a=2 – коэффициент оптимизации контура по МО.

Если T_2=0, то применяется пропорционально-интегральный регулятор

$$W_{\text{рег}}(p) = k'_{\text{рег}} \frac{T_{\text{из}}p+1}{T_{\text{и}}\, p} = k_{\text{рег}} \frac{T_{\text{из}}p+1}{T_{\text{из}}\, p}. \qquad (9)$$

При T_2=0 и T_1=0 применяется интегральный регулятор

$$W_{\text{рег}}(p) = k'_{\text{рег}} \frac{1}{T_{\text{и}}\, p} = k_{\text{рег}} \frac{1}{T_{\text{из}}\, p}. \qquad (10)$$

Коэффициенты усиления и постоянные времени передаточных функций регуляторов (9) и (10) определяются соответственно по выражениям (5), (6) и (8).

Оптимизация по МО контура с интегрирующим звеном

Для настройки на МО контура, содержащего интегрирующее звено (рис. 1, *б*), в общем случае выбирается пропорционально-дифференциальный регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}}(T_{\text{уп}}\, p + 1). \qquad (11)$$

Постоянная времени упреждения выбирается в соответствии с (7), а коэффициент усиления регулятора определяется по выражению

$$k_{\text{рег}} = \frac{T_0}{k_1 k_2 k_{\text{оу}}\, a T_\mu}. \qquad (12)$$

Если T_2=0, то применяется пропорциональный регулятор, коэффициент усиления которого определяется по выражению (12).

Частотные характеристики оптимизированных по МО контуров

При условии равенства постоянных времени T_μ частотные характеристики оптимизированных в соответствии с МО контуров по управлению одинаковы (рис. 2). Полоса пропускания по модулю и фазе

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0{,}71}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Частотные характеристики оптимизированных контуров по возмущению принципиально разные и зависят от параметров объекта управления (рис. 3, где $L(\omega)$ – логарифмические амплитудно-частотные и $\varphi(\omega)$ – фазо-частотные характеристики).

Показатели качества работы оптимизированных по МО контуров при отработке управляющих воздействий

Оптимизированные по МО контуры регулирования имеют в прямом канале интегрирующее звено (в контуре рис. 1, *а*, в составе регулятора, а в контуре рис. 1, *б*, в составе объекта управления). Это обеспечивает замкнутому контуру астатизм первого порядка по управлению. При отработке управляющего воздействия контуры имеют нулевую установившуюся ошибку $\Delta y_{\text{у.уст}}$ и скоростную ошибку

$$\Delta y_{\text{у.ск}} = \frac{2T_\mu}{k_{\text{оу}}}\left(\frac{dx}{dt}\right)_{\text{зад}} = 2T_\mu\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{зад}}. \qquad (13)$$

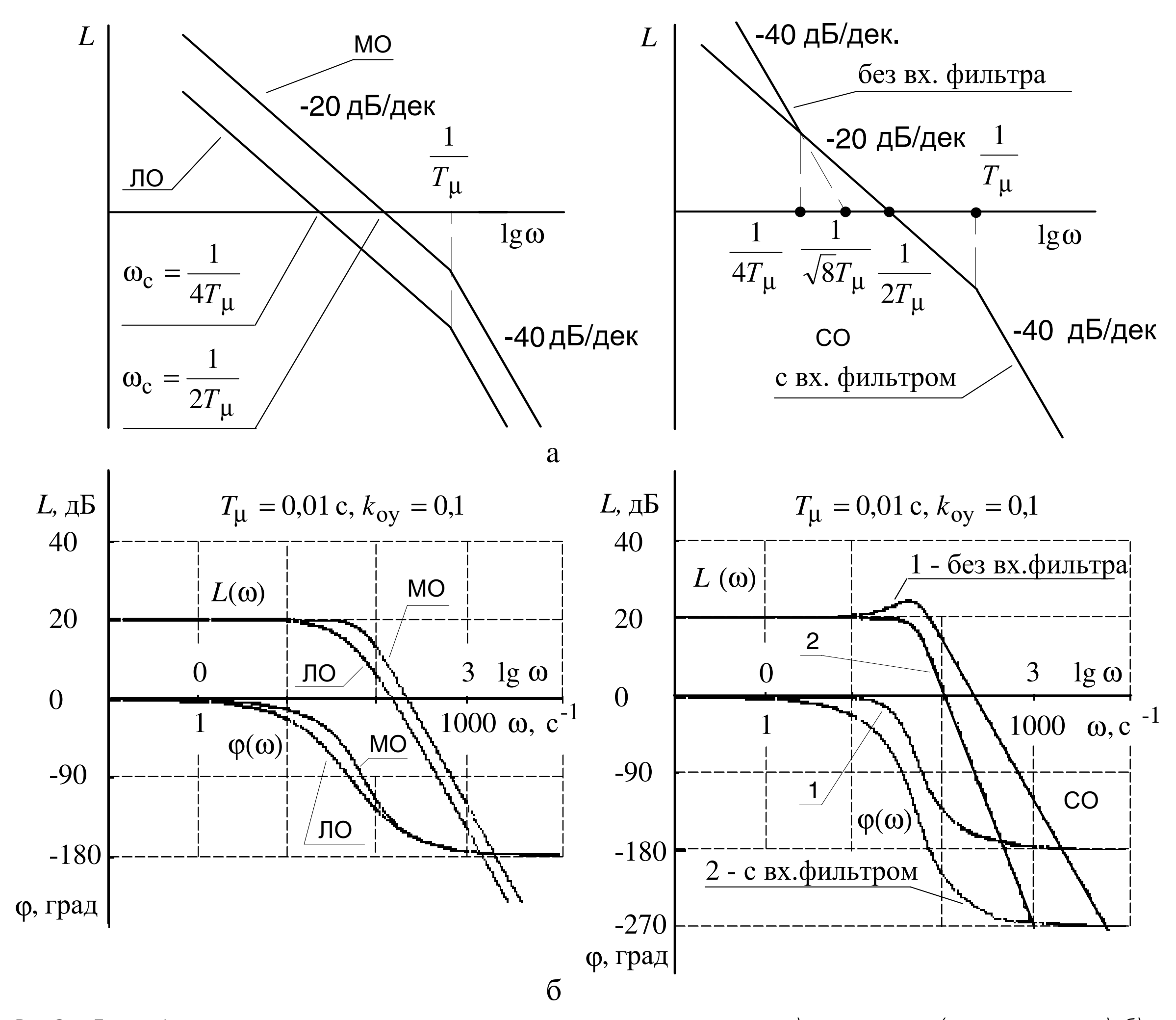


Рис 2. *Логарифмические частотные характеристики оптимизированного контура: а) разомкнутого (асимптотические); б) замкнутого по управлению*

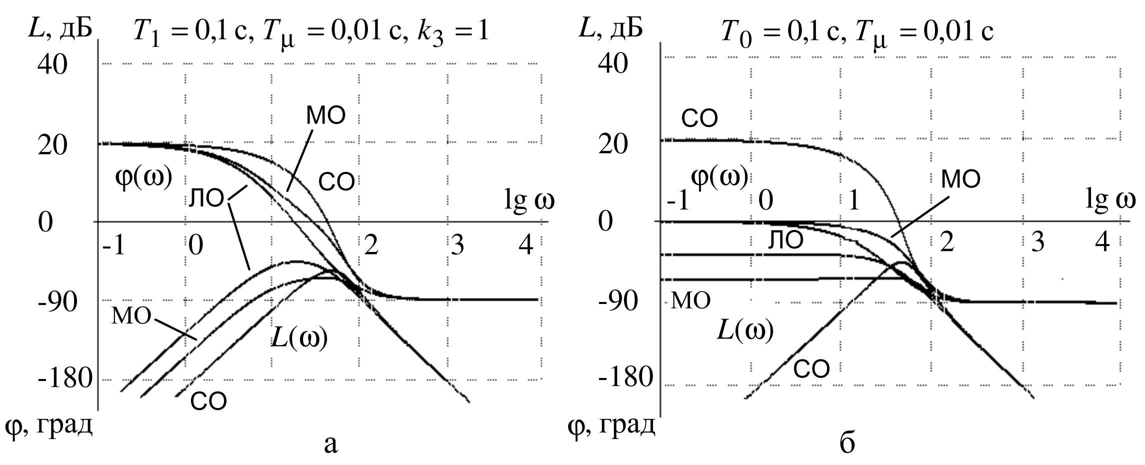


Рис. 3. *Логарифмические частотные характеристики по возмущению z_3 оптимизированного контура: а) с инерционными звеньями; б) с интегрирующим звеном*

Реакция оптимизированного по МО контура 2-го порядка на управляющее воздействие определяется только величиной малой постоянной времени T_μ и не зависит от других параметров контура и соотношения большой и малой постоянных времени объекта управления (рис. 4). Показатели отработки ступенчатых управляющих воздействий:

– перерегулирование σ=4,32%;
– время первого и окончательного вхождения в 5 % зону $t^{(5)}_{\text{ру1}}=t^{(5)}_{\text{ру2}}=4{,}1T_\mu$.

Переходные характеристики по управлению оптимизированных по МО контуров будут одинаковыми, если равны их малые постоянные времени T_μ (рис. 4). При необходимости полностью исключить перерегулирование контур настраивается на так называемый линейный оптимум (ЛО).

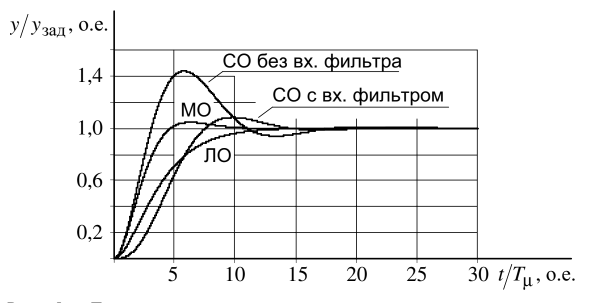


Рис. 4. *Переходные характеристики по управлению оптимизированного контура*

Показатели качества работы оптимизированного по МО контура с инерционными звеньями при отработке возмущающих воздействий

Реакция оптимизированного по МО контура с инерционными звеньями в зависимости от места приложения возмущающего воздействия приведена на рис. 5, *а*. В таком контуре при отработке возмущения интегрирующее звено входит в цепь обратной связи, поэтому он является астатической системой по возмущению и обеспечивает нулевую статическую ошибку вне зависимости от места приложения возмущающего воздействия: $\Delta y_{\text{в.уст}}$=0. Значение максимальной динамической ошибки $\Delta y_{\text{в.макс}}$ и время отработки ступенчатого возмущающего воздействия (окончательного вхождения в 10 % зону от $\Delta y_{\text{в.макс}}$) неоднозначно зависят от отношения постоянных времени T_1/T_μ и приведены для возмущающего воздействия z_3 в виде графиков на рис. 6 в относительных единицах. В абсолютных единицах максимальная ошибка и время переходного процесса определяются по выражениям:

$$\Delta y_{\text{в.макс}} = \Delta y^*_{\text{в.макс}}\, k_3\, \Delta z_3; \quad t_{\text{рв}} = t^*_{\text{рв}}\, T_\mu. \qquad (14)$$

Приближенно время переходного процесса и максимальное значение динамической ошибки для возмущения z_3 могут быть найдены следующим образом:

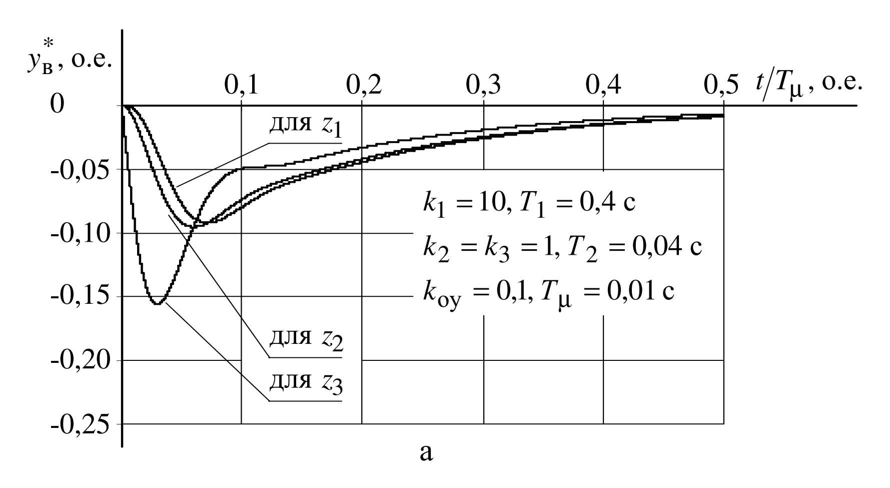
$$t_{\text{рв}} \approx \left(2{,}4 + 2{,}3\frac{T_1}{T_\mu}\right)T_\mu; \qquad (15)$$

$$\Delta y_{\text{в.макс}} \approx 1{,}93\frac{T_\mu}{T_1\left(1+\dfrac{2T_\mu}{T_1}\right)}k_3\,\Delta z_3. \qquad (16)$$

Показатели качества работы оптимизированного по МО контура с интегрирующим звеном при отработке возмущающих воздействий

Оптимизированный по МО контур (рис. 1, *б*) является статической системой по возмущению и имеет при отработке возмущающего воздействия не равную нулю установившуюся ошибку (рис. 5, *б*). Реакция оптимизированного контура на скачок возмущающего воздействия в общем случае определяется не только малой постоянной времени T_μ, но также зависит от других параметров контура и от отношения постоянных времени T_0/T_μ.

Установившаяся и максимальная динамическая ошибки вне зависимости от места приложения возмущающего воздействия зависят от отношения постоянных времени T_0/T_μ, в частности для возмущения z_3



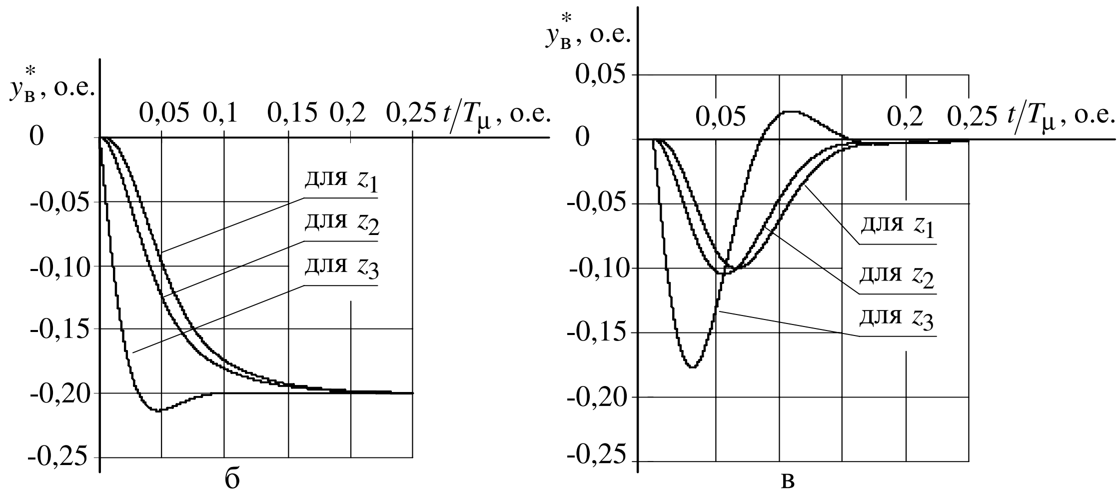


Рис. 5. *Реакция оптимизированного контура на ступенчатое возмущающее воздействие в зависимости от места приложения возмущения: а) контур с инерционными звеньями, МО; б) контур с интегрирующим звеном, МО; в) контур с интегрирующим звеном, СО*

$$\Delta y_{в.уст} = 2k'_{об}\frac{T_\mu}{T_0}\Delta z; \qquad (17)$$

$$\Delta y_{в.макс} = 2{,}134\,k_3\frac{T_\mu}{T_0}\Delta z_3, \qquad (18)$$

где $k'_{об}$ – коэффициент усиления части объекта управления, входящей в прямой канал отработки возмущающего воздействия.

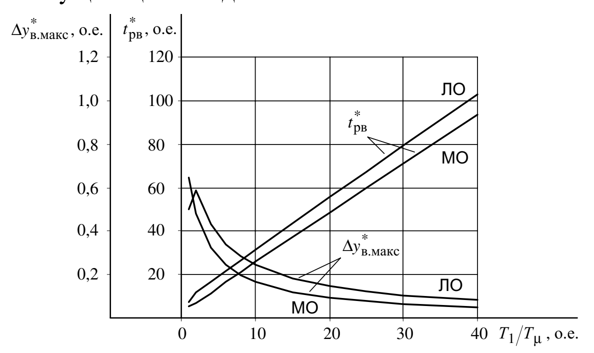


Рис. 6. *Показатели отработки ступенчатого возмущающего воздействия z_3 оптимизированным контуром с инерционными звеньями*

Следует отметить, что отношение $\frac{\Delta y_{в.макс}}{\Delta y_{в.уст}} = 1{,}067$ остается всегда постоянным, а время отработки возмущения z_3 зависит только от значения малой постоянной времени T_μ: $t_{рв}=2{,}45T_\mu$. Переходная характеристика по возмущению приведена на рис. 7, где за базовое значение принято установившееся значение ошибки при оптимизации по линейному оптимуму.

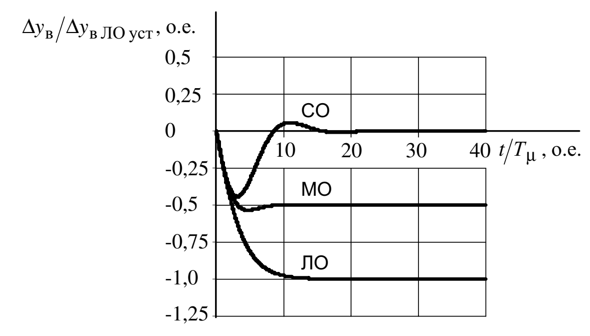


Рис. 7. *Переходные характеристики по возмущению z_3 оптимизированного контура с интегрирующим звеном*

Оптимизация по линейному оптимуму

При настройке на ЛО выбирается коэффициент оптимизации a=4. Передаточные функции контура определяются выражениями (1–3). Частотные и переходные характеристики по управлению оптимизированных по ЛО контуров одинаковые, определяются только значением малой постоянной времени T_μ и приведены соответственно на рис. 2 и 4. Полоса пропускания замкнутых контуров по модулю и фазе:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0{,}33}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0{,}51}{T_\mu}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Оптимизированные по ЛО контуры имеют следующие показатели качества отработки управляющих воздействий:

$$\Delta y_{\text{у.ск}} = \frac{4T_\mu}{k_{\text{оу}}}\left(\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right)_{\text{зад}} = 4T_\mu\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\right)_{\text{зад}}; \qquad (19)$$

$$\Delta y_{\text{у.уст}} = 0; \quad \sigma = 0\,\%; \quad t_{\text{ру1}}^{(5)} = t_{\text{ру2}}^{(5)} = 9{,}5\,T_\mu.$$

Контур с инерционными звеньями, оптимизированный по ЛО, обеспечивает нулевую установившуюся ошибку по возмущению $\Delta y_{\text{в.уст}}$=0, а значение максимальной ошибки $\Delta y_{\text{в.макс}}$ и время отработки $t_{\text{рв}}$ ступенчатого возмущения z_3 неоднозначно зависят от отношения T_1/T_μ и приведены в относительных единицах на рис. 6. В абсолютных единицах показатели качества работы контура определяются по выражениям (14). Время переходного процесса и максимальное значение динамической ошибки могут быть приближенно найдены следующим образом:

$$t_{\text{рв}} \approx \left(7{,}15 + 2{,}42\frac{T_1}{T_\mu}\right)T_\mu, \qquad (20)$$

$$\Delta y_{\text{в.макс}} \approx 3{,}5\frac{T_\mu}{T_1\left(1+\dfrac{4T_\mu}{T_1}\right)}k_3\,\Delta z_3. \qquad (21)$$

Логарифмические частотные и переходные характеристики по возмущению контура с инерционными звеньями, оптимизированного по ЛО, приведены соответственно на рис. 3, *а*, и рис. 6.

Контур с интегрирующим звеном при оптимизации по ЛО имеет следующие показатели отработки ступенчатых возмущающих воздействий:

$$\Delta y_{\text{в.уст}} = \Delta y_{\text{в.макс}} = 4k'_{\text{об}}\frac{T_\mu}{T_0}\Delta z; \qquad (22)$$

$$t_{\text{рв}} = 6{,}53\,T_\mu. \qquad (23)$$

Логарифмические частотные и переходные характеристики контура по возмущению приведены соответственно на рис. 3, *б*, и рис. 7.

Заключение

Настройка контура на модульный оптимум не является оптимальной ни по быстродействию, которое можно увеличить, повышая перерегулирование (коэффициент оптимизации контура a<2), ни по перерегулированию, которое можно уменьшить, снижая быстродействие (a>2). Однако такая оптимизация в большинстве случаев удовлетворяет требованиям к работе замкнутого контура по управлению в отношении и быстродействия, и перерегулирования. Благодаря этому, а также простоте реализации, модульный оптимум является наиболее распространенным способом оптимизации контуров регулирования в системах электропривода. По возмущению настройка контуров на модульный оптимум имеет явные недостатки: малое быстродействие контура с инерционными звеньями и наличие установившейся ошибки в контуре с интегрирующим звеном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kessler C. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. Teil III. Die optimale Einstellung des Reglers nach dem Betragsoptimum // Regelungstechnik. – 1955. – B. 3. – H. 2. – S. 40–49.
2. Kessler C. Das symmetrische Optimum. Teil I und III // Regelungstechnik. – 1958. – B. 6. – H. 11. – S. 395–400; H. 12. – S. 432–436.
3. Voda A.A., Landau I.D. A method for the auto-calibration of PID controllers // Automatica. – 1995. – V. 31. – № 1. – P. 41–53.
4. O'Dwyer A. PI and PID controller tuning rules for time delay processes: a summary // Proc. of the Irish signals and systems conference. – N.U.I., Galway, 1999. – P. 331–346.
5. Preitl S. Precup, R.E. An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for PI and PID controllers // Automatica. – 1999. – V. 35. – № 10. – P. 1731–1736.
6. Vrancic D., Strmenic S., Hanus R. Improving disturbance rejection of PI controllers by means of the magnitude optimum method // ISA Transactions. – 2004. – V. 43. – № 1. – P. 73–74.